Untersuchung der Energieverteilung rückdiffundierter Elektronen an dünnen Metallschichten

(Auszug)

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität
zu Würzburg

vorgelegt von
Diplom-Physiker
Karl Rüttiger
aus Gräfendorf bei Gemünden/Main

Referent: Prof. Dr. H. Kulenkampff

Würzburg 1956

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Tag der mündl. Prüfung:
26. November 1956.

HANDELSDRUCKEREI

Einleitung

Beim Durchsetzen von Materie erleiden Elektronen infolge ihrer Wechselwirkung mit den Atomen eine Änderung ihrer Geschwindigkeit nach Größe (Energieverlust) und Richtung (Diffusion). Einzelne Elektronen können dabei ihre Richtung so stark ändern, daß sie noch vor Aufzehrung ihrer ursprünglichen Energie an der Eintrittsseite des Streukörpers wieder auszutreten vermögen. Diese Erscheinung — nach L e n a r d als Rückdiffusion bezeichnet — ist abhängig von der Energie und dem Auftreffwinkel der Primärelektronen sowie der Schichtdicke und der Ordnungszahl des Streumaterials.

Ältere Untersuchungen der Elektronenrückdiffusion befassen sich vornehmlich mit der Bestimmung der Menge der rückdiffundierten Elektronen in Abhängigkeit von der Dicke der streuenden Schicht. In neuerer Zeit wurde hauptsächlich die Energieverteilung der rückdiffundierten Elektronen an massiven Streukörpern gemessen. Lediglich P. B. W a g n e r (Phys. Rev. *35*, 98, 1930) und K. G e n t n e r (Ann. Phys. *31*, 417, 1938) haben einige Messungen der Energieverteilung an dünnen Schichten durchgeführt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, an verschiedenen Materialien (AL, Ni, Au) die Energieverteilung rückdiffundierter Elektronen in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei einer Primärspannung von 25 kV und senkrechtem Elektroneneinfall auf die Antikathode näher zu untersuchen.

Meßanordnung

Zur Ermittlung der Energieverteilung wird eine Variante der Lenard'schen Gegenfeldmethode verwendet, welche gestattet, die Differentiation der Gegenspannungskurven direkt durch die Meßapparatur vorzunehmen. Der Gegenspannung wird hierzu eine Wechselspannung überlagert. Elektronen, welche gerade die Energie eU besitzen, können dann in der positiven Halbwelle der Wechselspannung die Gegenfeldelektrode erreichen, in der negativen jedoch nicht. Der Meßelektrodenstrom erhält dadurch eine Wechselstromkomponente, deren Amplitude bei nicht zu großer Modulation der Gegenspannung der gesuchten Energieverteilung direkt proportional ist.

In ihren wesentlichen Teilen besteht die Apparatur aus einer Siemens-Stabilivolt-Hochspannungsanlage, einer Hochvakuumröhre, einem Stimmgabelgenerator zur Erzeugung der Wechselspannung sowie einem Resonanzverstärker. Die Hochvakuumröhre enthält das Strahlerzeugungssystem, die Streufolie und die Gegenfeldelektroden. Von einer Glühkathode werden Elektronen emittiert, welche nach Durchlaufen eines Beschleunigungsfeldes auf die Metallfolie, an der die Rückdiffusion untersucht werden soll, auftreffen. Um diese sind konzentrisch vier halbkugelförmige Eletroden angeordnet. Die innerste Elektrode ist mit einem zonenförmigen Lochkranz versehen und erlaubt dadurch Rückdiffusionselektronen mit definiertem Ablenkwinkel auszusondern. Die zweite Elektrode besitzt dieselbe Lochanordnung, so daß die Elektronen zur dritten, der eigentlichen Meßelektrode gelangen können. Zum Schutze gegen Streuelektronen ist diese von einer weiteren Kalotte umgeben.

An den äußeren drei Elektroden liegt die Gegenspannung, welche an einem Hochspannungsteiler abgegriffen wird und in Stufen von 1/200 der angelegten Primärspannung variiert werden kann. Ihr ist mittels eines Transformators eine konstante sinusförmige Wechselspannung einer Frequenz von 512 Hz, die ein Stimmgabelgenerator liefert, überlagert. Die Wechselstromkomponente des Meßelektrodenstromes wird in einem dreistufigen batteriegespeisten Resonanzverstärker einer Bandbreite von 17 Hz verstärkt und gelangt nach Gleichrichtung mit einem Mirravi-Spiegelgalvanometer zur Anzeige. Die Verwendung eines Resonanzverstärkers ist angezeigt, damit Störspannungen mit einer anderen als der Meßfrequenz die Messung nicht beeinflussen. Außerdem kann die überlagerte Wechselspannung ohne fälschenden Einfluß auf das Energiespektrum relativ groß gewählt und damit die Intensität des Meßstromes gesteigert werden.

Da bei der Versuchsanordnung das Potential an der Meßelektrode im Rhythmus der Modulationsfrequenz schwankt, fließt von ihr ein kapazitiver Verschiebungsstrom zur Erde ab, welcher ebenfalls durch das Galvanometer angezeigt wird. Dieser unerwünschte Wechselstrom läßt sich durch eine zur angelegten Wechselspannung um 180° phasenverschobene Spannung kompensieren. Die gewählte Schaltung erlaubte den Reststrom kleiner als $5 \cdot 10^{-12}$ A zu halten. Jedoch mußte während einer Meßreihe die genaue Kompensation öfter überprüft und besonders nach Überschlägen in der Röhre nachgestellt werden.

Die untersuchten Metallfolien konnten nach einem von E Fenner (ZS. techn. Phys. *20*, 292, 1939) angegebenem Verfahren hergestellt werden: Auf eine Glasplatte wurde zunächst eine dünne NaCl-Schicht und anschließend die gewünschte Metallschicht aufgedampft. Durch Eintauchen in Wasser ließ sich die Folie von ihrer Unterlage trennen. Schichten dünner als 0,2 μ mußten direkt auf eine dünne Pioloformunterlage aufgedampft werden. Zur Bestimmung ihrer Massendicke wurden die Folien auf einer im Institut gebauten Mikrowaage gewogen.

Ergebnisse

So hergestellte Metallschichten aus Aluminium, Nickel und Gold, deren Massendicke zwischen 0,1 und 0,6 mg/cm² variierte, wurden mit Elektronen von 25 keV Energie senkrecht beschossen. Die Energieverteilung der rückdiffundierten Elektronen wurde bei den Ablenkwinkeln 117° und 137° (gemessen gegen die Einfallsrichtung) bestimmt. Die angelegte Wechselspannung betrug 67,5 V. An Al-Folien konnten die Messungen mit Primärströmen von 5—10 μA durchgeführt werden, Au- und Ni-Folien waren dagegen nur mit maximal 2 μA belastbar.

Allgemein zeigen die erhaltenen Energiespektren einen ähnlichen charakteristischen Verlauf wie die an massivem Material gemessenen. Bei kleinen Energien beginnend, fallen sie zunächst steil ab, steigen sodann mit wachsender Energie mehr und mehr an und erreichen bei hohen Energien ein Maximum. Nach dessen Überschreiten fallen sie abermals steil ab, endigen jedoch bei der vollen Primärenergie mit einem endlichen Wert. Mit abnehmender Schichtdicke nimmt die Menge der langsamen und mittelschnellen Elektronen ab, die Zahl der schnellsten Elektronen ändert sich dagegen nur wenig. Das Maximum der Spektren wird dabei steiler und verschiebt

sich bei Aluminium und Nickel nach höheren Energiewerten. Bei Gold ist ein Wandern des Maximums nicht feststellbar.

Die Menge der rückdiffundierten Elektronen steigt bei allen drei Metallen mit der Schichtdicke zunächst stärker als linear an, nähert sich sodann flacher verlaufend dem an der massiven Streuschicht erhaltenen Wert, welcher bei einer Schichtdicke von 600 $\mu g/cm^2$ (etwa halbe praktische Reichweite der Elektronen) nahezu erreicht wird. Einen ähnlichen Verlauf mit der Schichtdecke ergibt auch der mittlere Energieverlust (lineares Mittel des Energieverlustes der einzelnen Elektronen), doch ist hier der anfängliche Anstieg der Kurven ziemlich linear.

In Abhängigkeit vom Anodenmaterial zeigt sich, daß bei etwa gleicher Massendicke der Folien das Maximum um so stärker ausgeprägt ist und bei um so größeren Energiewerten liegt, je größer die Ordnungszahl der Metallschicht ist. Bildet man jedoch das Verhältnis der Elektronen, welche mit gleicher Energie aus der Dünnen bzw. massiven Schicht austreten, so ergeben sich bei etwa gleicher Massendicke aber verschiedenem Streumaterial ähnlich verlaufende Kurven.

Die Winkelabhängigkeit liegt in dem Sinne, daß bei gleicher Schichtdecke dem größeren Ablenkwinkel ein größerer wahrscheinlicher Energieverlust entspricht. Mit abnehmender Schichtdicke wird der Unterschied geringer.

Diskussion

Eine von J. O. Brand (Ann. Phys. *26*, 609, 1936) und von W. Bothe (ZS. Naturf. *4a*, 542, 1949) angegebene Überlegung erklärt qualitativ die an massiven Antikathoden gemessenen Energiespektren. Sie setzt voraus, daß die rückdiffundierten Elektronen bis zu ihrer Umkehr mehr oder minder tief in die Materie eindringen und dadurch unterschiedliche Energieverluste erleiden.

Wird nun die Dicke der streuenden Schicht suczessive verkleinert, so wird von einer Schichtdicke an, die etwa der halben prakt. Reichweite der Elektronen entspricht, ein Teil der Elektronen nicht mehr die zur Umkehr nötige Ablenkung erhalten und somit dem Rückdiffusionsspektrum verloren gehen. Dieser Vorgang erfaßt zunächst nur Elektronen mit großen Energieverlusten, erstreckt sich dann aber mehr und mehr auch auf solche mit geringen Energieverlusten.

Da der mittlere Energieverlust pro Wegstrecke in erster Näherung proportional Z (Z = Ordnungszahl), die Dicke der Streuschicht bei gleicher Massendicke dagegen wie Z^{-1} abnimmt, wird das erwähnte Absinken der Energiespektren unabhängig vom Streumaterial bei annähernd gleichen Energieverlusten eintreten.

Die Messungen können durch diese Überlegung qualitativ erklärt werden.